

## ZADANIE C4

### BADANIE PROMIENIOWANIA TERMICZNEGO

#### I. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest badanie zależności od temperatury, współczynnika absorpcji i odległości promieniowania termicznego.

#### II. Podstawy teoretyczne

Transport ciepła to jeden ze sposobów (obok pracy) przekazywania energii pomiędzy układami termodynamicznymi. Wymiana ciepła zawsze przebiega z ciała o temperaturze wyższej do ciała o temperaturze niższej, zgodnie z drugą zasadą termodynamiki. Jeżeli rozpatrywany obiekt ma inną temperaturę niż jego otoczenie lub znajdujące się w pobliżu inne ciała, wymiana ciepła odbywać się będzie do momentu osiągnięcia stanu równowagi termicznej.

Istnieją trzy sposoby przekazu ciepła:

- przewodzenie ciepła polegające na przekazywaniu energii przez bezładny ruch cząsteczek i ich zderzenia.
- konwekcja (unoszenie ciepła) na skutek przemieszczania się masy cieczy lub gazu (tzw. prądów konwekcyjnych),
- promieniowanie termiczne, które polega na przenoszeniu energii przez promieniowanie elektromagnetyczne emitowane w wyniku cieplnego ruchu cząsteczek. Wymiana ciepła przez promieniowanie nie wymaga obecności ośrodka pomiędzy ciałami, między którymi ciepło jest wymieniane, czyli może zachodzić przez próżnię.

W ogólności oddziaływanie promieniowania z materią opisują trzy współczynniki:

- współczynnik absorpcji  $A$ , określający jaki ułamek padającego na ciało promieniowania zostanie przez nie pochłonięte,
- współczynnik odbicia  $R$ , określający jaki ułamek padającego na ciało promieniowania zostanie przez nie odbite,
- współczynnik transmisji  $T$ , określający jaki ułamek padającego na ciało promieniowania zostanie przez nie przepuszczone,

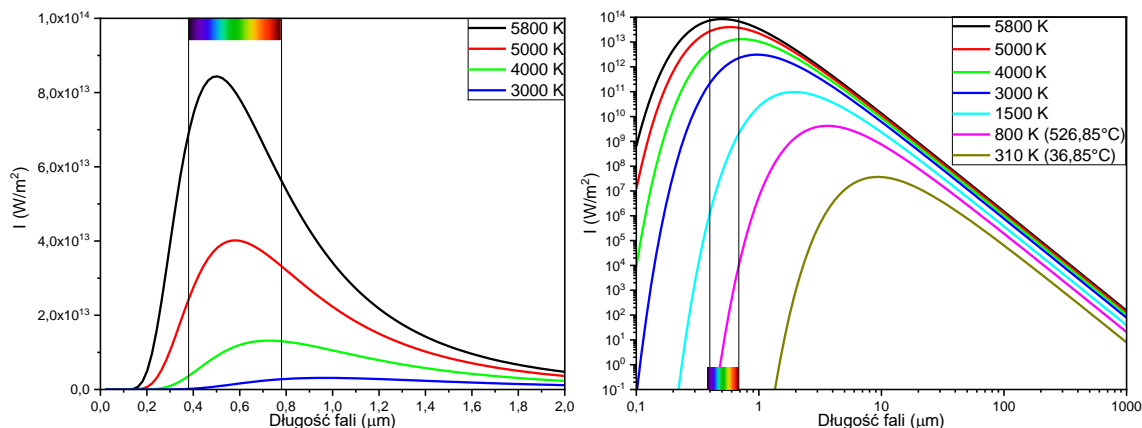
przy czym dla dowolnego ciała  $A + R + T = 1$ .

Ciało doskonale czarne to wyidealizowane ciało fizyczne całkowicie pochłaniające padające na nie promieniowanie elektromagnetyczne, niezależnie od temperatury tego ciała, kąta padania i widma padającego promieniowania. Współczynnik absorpcji ciała doskonale czarnego wynosi  $A = 1$  dla całego zakresu widma. Jego przeciwieństwami są ciało doskonale białe (ciało całkowicie rozpraszające padające na nie promieniowanie,  $R = 1$ ) oraz ciało doskonale przezroczyste (ciało całkowicie przepuszczające padające na nie promieniowanie,  $T = 1$ ). Podobne cechy do ciała doskonale białego ma ciało zwierciadlane różniące się od ciała doskonale białego tylko tym, że światło nie jest przez nie rozpraszane a odbijane, zgodnie z prawem odbicia. Ciało, którego współczynnik absorpcji nie zależy od długości fali promieniowania ale jest mniejsza niż 1 nazywamy ciałem szarym.

Zdolność emisyjna ciała określająca możliwość emisji elektromagnetycznego promieniowania termicznego przez to ciało jest funkcją temperatury ciała i długości fali emitowanego promieniowania. Zdolność emisyjna ciała znajdującego się w temperaturze  $T$  do emisji promieniowania o długości fali  $\lambda$  równa jest strumieniowi energii promieniowania na jednostkę powierzchni. Najwyższą zdolność emisyjną w dowolnej temperaturze ma ciało doskonale czarne. Zgodnie z wyprowadzeniem Plancka strumień promieniowania na jednostkę powierzchni ciała doskonale czarnego o temperaturze  $T$

będącego w równowadze termodynamicznej wyraża się wzorem

$$I(T, \lambda) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (1)$$



Rysunek 1. Widmo promieniowania ciała doskonale czarnego w zależności od jego temperatury.

Widmo promieniowania elektromagnetycznego emitowane przez ciało doskonale czarne w stałej temperaturze zostało przedstawione na rysunku 1. Długość fali, w której natężenie promieniowania osiąga maksimum, maleje wraz ze wzrostem temperatury ciała i jest określona przez prawo przesunięć Wiena. W temperaturze pokojowej maksimum natężenia przypada na promieniowanie podczerwone. Gdy temperatura przekracza 500°C, ciało doskonale czarne zaczyna emitować znaczącą ilość światła widzialnego. Wraz ze wzrostem temperatury rozkład obejmuje coraz więcej zakresu światła widzialnego powodując zmianę barwy obserwowanego obiektu najpierw na czerwoną, potem żółtą i na końcu jasną niebiesko-białą. Słońce, którego efektywna temperatura (temperatura ciała doskonale czarnego, które emituje tę samą ilość promieniowania) wynosi w przybliżeniu 5800 K, jest w przybliżeniu ciałem doskonale czarnym, którego maksimum promieniowania przypada na żółto-zieloną część widma.

Całkowitą moc promieniowania jednostki powierzchni we wszystkich długościach fal, czyli strumień  $J(T)$  mocy promieniowania, przedstawia tzw. prawo Stefana-Boltzmann'a:

$$J(T) = \int_0^{\infty} I(T, \lambda) d\lambda = \sigma T^4, \quad (2)$$

gdzie  $\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} \approx 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$  jest stałą, zwaną stałą Stefana-Boltzmann'a.

Dla ciał innych niż ciało doskonale czarne można określić ich względną zdolnością emisyjną jako stosunek zdolności emisyjnej badanego ciała do zdolności emisyjnej ciała doskonale czarnego

$$\varepsilon = \frac{I(T, \lambda)}{I_{CDC}(T, \lambda)} \quad (3)$$

Względna zdolność emisyjna jest liczbowo równa współczynnikowi absorpcji. Wartości tego parametru bliskie 1 ( $> 0,9$ ) są osiągnięte dla substancji takich jak sadza, woda, lód, czy skóra człowieka. Wartości bliskie zero tego parametru ( $< 0,1$ ) mierzy się z kolei dla wielu metali pozbawionych warstwy tlenków z powierzchni i wypolerowanych. Według przyjętej definicji względna zdolność emisyjna jest bezwymiarowa. W wielu podręcznikach, zdolność emisyjna rozumiana jest jako względna zdolność emisyjna.

Ciało o temperaturze  $T$ , o współczynniku absorpcji  $A$  i całkowitym polu powierzchni  $S$  znajdujące się w otoczeniu o temperaturze  $T_0 < T$ , będzie jednocześnie emitować promieniowanie termiczne o mocy

$$P_{em} = S J_{em} = S \varepsilon J_{CDC} = S A J_{CDC} = S A \sigma T^4 \quad (4)$$

i absorbować promieniowanie emitowane przez otoczenie

$$P_{abs} = SJ_{abs} = SAJ_{pad} = AS\sigma T_{ot}^4. \quad (5)$$

Efektywna moc wypromieniowana przez ciało będzie więc równa

$$\Delta P = P_{em} - P_{abs} = AS\sigma(T^4 - T_{ot}^4). \quad (6)$$

Energia ta będzie promieniowana izotropowo i w odległości  $r$  od ciała będzie rozdystrybuowana na powierzchni sfery o promieniu  $r$ . W związku z tym w odległości  $r$  od ciała strumień mocy wynosić będzie

$$J_r = \frac{\Delta P}{4\pi r^2} = \frac{AS\sigma(T^4 - T_{ot}^4)}{4\pi r^2}. \quad (7)$$

Oczywiście emisja promieniowania termicznego prowadzi do zmniejszania temperatury ciała, aż do osiągnięcia stanu równowagi termicznej, kiedy to  $P_{em} = P_{abs}$  i efektywna moc promieniowana przez ciało będzie równa zero, a temperatura ciała będzie równa temperaturze otoczenia.

### III. Wykonanie pomiarów

#### III.1. Wyposażenie

Masz do dyspozycji:

- kostkę Lesliego z regulatorem temperatury (3B Scientific Physics U8498299-230)
- detektor promieniowania termicznego (PASCO TD-8553)
- lampę Stefana-Boltzmana (Pasco TD-8555)
- zasilacz stabilizowany
- mierniki uniwersalne BRYMEN BM805s do pomiaru napięcia i natężenia prądu płynącego przez lampę Stefana-Boltzmana
- miernik uniwersalny BRYMEN BM827s do pomiaru napięcia na detektorze
- przewody
- osłona z pianki izolującej
- ekran szklany.

Kostka Lesliego to aluminiowy sześcián używany do ilościowego badania promieniowania cieplnego ciała w zależności od temperatury i rodzaju powierzchni. Kostka ma cztery różne powierzchnie czołowe (metaliczną matową, metaliczną błyszczącą, czarną i białą), które mogą być podgrzane od 40°C do 120°C. Kostkę można obracać, ustawiając wybraną powierzchnię w kierunku detektora promieniowania. Ogrzewanie kostki odbywa się poprzez zamontowaną wewnątrz żarówkę, natomiast jej temperatura jest odczytywana poprzez zamontowany czujnik temperatury i wyświetlana na panelu sterującym. Zmiana ustawień temperatury jest możliwa za pomocą przycisków +/- na panelu sterującym. Ustawienie na panelu temperatury 40°C powoduje wyłączenie ogrzewania kostki. Dioda LED wskazuje stan pracy ogrzewacza. Za pomocą przycisku SET możesz zmienić jednostki w jakich jest wyświetlana temperatura (°C lub °F).

**UWAGA!!!** W trakcie eksperymentu powierzchnia kostki może być bardzo gorąca (nawet do 120°C). Podczas obracania należy korzystać z dedykowanego do tego uchwytu i bardzo uważać, aby przez przypadek nie dotknąć powierzchni kostki!

Dostępny w doświadczeniu detektor promieniowania radiacyjnego to miniaturowy termostos czyli urządzenie elektroniczne, które przekształca energię ciepłą w energię elektryczną. Składa się z kilku termopar połączonych szeregowo i działa na zasadzie efektu termoelektrycznego, tj. generuje napięcie, gdy złącza termopar mają różną temperaturę. W związku z tym dla precyzji pomiaru ważne jest aby utrzymywać temperaturę detektora stałą, aby nie dopuścić do wzrostu temperatury złącza referencyjnego, co z kolei skutkowałoby dryfem odczytywanego napięcia. Dlatego detektor powinien

być osłonięty od źródła promieniowania termicznego, gdy nie jest wykonywany pomiar. Służy do tego osłona sprężynowa, która jest otwierana i zamykana przez przesunięcie pierścienia na obudowie detektora oraz osłona z pianki izolacyjnej, którą należy skierować srebrną stroną w kierunku źródła promieniowania termicznego. Generowane napięcie jest rzędu do kilkudziesięciu miliwoltów, dlatego do pomiaru tego napięcia użyj multimetru o odpowiedniej dokładności dla tego zakresu napięć. Ważnym aspektem jest, że sam detektor ma temperaturę różną od zera bezwzględnego, ale ma temperaturę otoczenia  $T_0$ . W związku z tym nie tylko absorbuje ale również emituje promieniowanie cieplne. Napięcie mierzone na detektorze jest proporcjonalne efektywnej mocy promieniowania na niego padającego, a więc do różnicy strumienia mocy zaabsorbowanej przez detektor ( $J_{abs}$ ) i strumienia mocy emitowanej przez niego energii  $U \propto J_{abs} - \sigma T_0^4$ . Istotnym czynnikiem jest również czułość elektroniki samego detektora, która w najprostszym przypadku sprawia, że tylko część padającego na niego promieniowania jest zaabsorbowana. W związku z tym, w ogólności wynik eksperymentu powinna opisywać zależność

$$U = \alpha J_{pad} - \beta. \quad (8)$$

gdzie  $J_{pad}$  jest energią padającą na jednostkową powierzchnię detektora w jednostkowym czasie, a  $\alpha$  i  $\beta$  są fenomenologicznymi stałymi.

Wchodząca w skład układu lampa Stefana-Boltzmann'a to żarówka z włóknem wolframowym, która jest wysokotemperaturowym źródłem promieniowania cieplnego. Przy odpowiednim ustawieniu w kierunku detektora, włókno może być traktowane jako dobre przybliżenie punktowego źródła promieniowania cieplnego. Regulując moc do lampy (maks. 13 V, 3 A), temperatura żarnika może uzyskać około 3000°C. Opór żarnika jest określany przez dokładny pomiar napięcia  $U$  i prądu  $I$  przepływającego przez żarówkę i zmienia się wraz z temperaturą żarnika. Na podstawie jego pomiaru można wyznaczyć temperaturę żarnika ( $T$ ) korzystając ze wzoru:

$$T = \frac{R - R_{ref}}{\alpha R_{ref}} + T_{ref} \quad (9)$$

gdzie  $R = U/I$  to opór żarnika w temperaturze  $T$ ,  $T_{ref}$  to temperatura odniesienia (najczęściej temperatura pokojowa)  $R_{ref}$  to opór żarnika w temperaturze odniesienia, natomiast  $\alpha$  to współczynnik temperaturowy rezystywności dla żarnika. W przypadku używanych żarówek opór referencyjny w temperaturze 300 K wynosi 0,277  $\Omega$ . W ogólności dla dużych różnic temperatur  $\alpha$  nie jest stała i zależy od temperatury włókna. Aby wyznaczyć temperaturę należy skorzystać z Tabeli 1 dokonując liniowej interpolacji pomiędzy dwoma najbliższymi punktami zmierzonego oporu żarnika.

Tabela 1. Opór żarnika w stosunku do oporu żarnika w temperaturze 300 K, w zależności od temperatury żarnika.

$T$ [K]	$\frac{R}{R_{300\text{ K}}}$	$T$ [K]	$\frac{R}{R_{300\text{ K}}}$	$T$ [K]	$\frac{R}{R_{300\text{ K}}}$
300	1	1400	6,58	2500	13,08
400	1,43	1500	7,14	2600	13,72
500	1,87	1600	7,71	2700	14,34
600	2,34	1700	8,28	2800	14,99
700	2,85	1800	8,86	2900	15,63
800	3,36	1900	9,44	3000	16,29
900	3,88	2000	10,03	3100	16,95
1000	4,41	2100	10,63	3200	17,62
1100	4,95	2200	11,24	3300	18,28
1200	5,48	2300	11,84	3400	18,97

1300	6,03	2400	12,46	3500	19,66
------	------	------	-------	------	-------

W przypadku żarówek używanych w tym ćwiczeniu, przyjęcie fenomenologicznej zależności współczynnika temperaturowej rezystywności od zmierzonego oporu żarnika postaci:

$$\alpha \text{ (K}^{-1}\text{)} = 0,00407 \cdot \left(\frac{R}{R_{ref}}\right)^{0,11778} \quad (10)$$

pozwała na wyznaczenie temperatur powyżej 1400 K z niepewnością ok. 5 K.

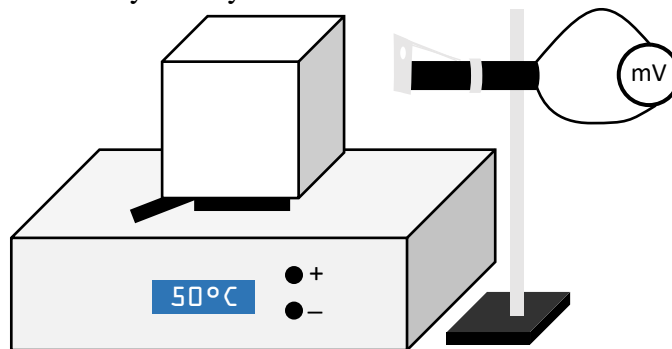
**UWAGA!!! Napięcie zasilające żarówkę nie może nigdy przekraczać 13 V, gdyż spowoduje to jej przepalenie!**

### III.2. Planowanie pomiarów

Przed rozpoczęciem pomiarów zapisz jaka jest temperatura otoczenia i w trakcie wykonywania ćwiczenia kontroluj, czy się ona nie zmienia. W przypadku zmian temperatury otoczenia zapisuj o ile się ona zmieniła i w którym momencie pomiarów.

### III.3. Badanie promieniowania termicznego kostki Lesliego

W tej części eksperymentu wykonasz względne pomiary mocy promieniowania termicznego emitowanego ciała w zależności od jego temperatury i rodzaju powierzchni. Ustaw układ pomiarowy zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 2.



Rysunek 2. Układ pomiarowy do pomiaru promieniowania termicznego dla różnych powierzchni i zakresu niskich temperatur.

Detektor promieniowania powinien być skierowany bezpośrednio na środek jednej z powierzchni kostki Lesliego i ustawiony jak najbliżej tej powierzchni tak, żeby powierzchnia detektora była równoległa do powierzchni sześcianu. Ważne jest jednak, że ustawienie detektora powinno pozwalać na swobodne obracanie kostki bez zmiany położenia detektora. Zwróć uwagę, aby położenie czujnika w stosunku do kostki się nie zmieniało w trakcie pomiarów. Przy WYŁĄCZONYM GRZANIU kostki zapisz odczyty detektora obracając kostkę Lesliego, tak aby była skierowana różnymi powierzchniami w stronę detektora.

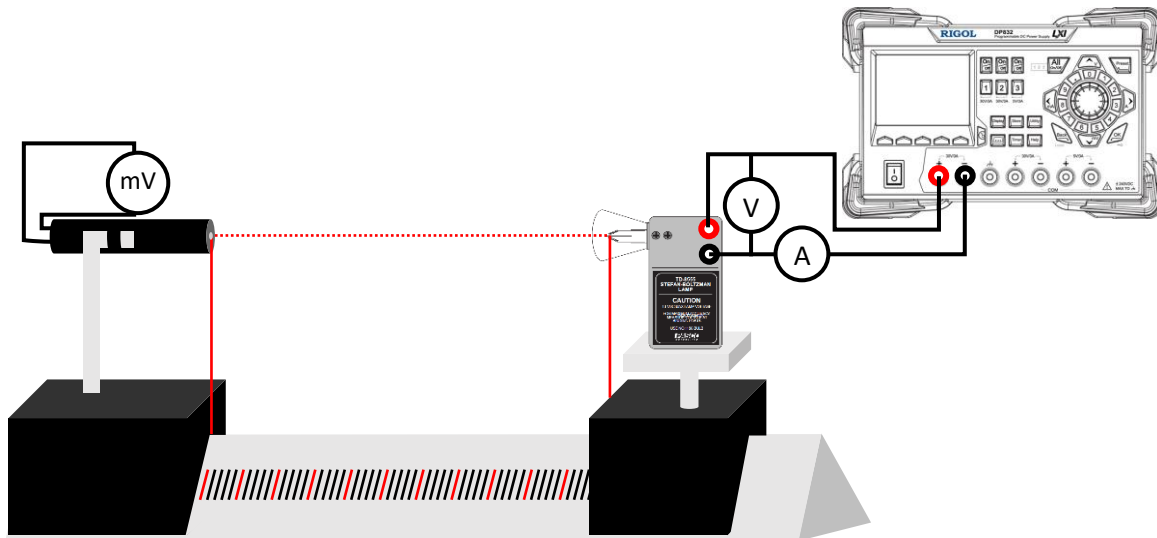
Osoń detektor przed kostką za pomocą odbijającej osłony termicznej, zwróconej stroną srebrną w stronę kostki. Ustaw temperaturę kostki na 50°C. Poczekaj aż temperatura się ustabilizuje, tzn. odczytywana temperatura będzie oscylować wokół wartości ustawionej z małą amplitudą. Odczytaj i zapisz wartości napięcia generowanego na detektorze dla każdej powierzchni sześcianu. Wykonaj odczyt szybko, zdejmując osłonę termiczną tylko na tak długo, ile trwa dokonanie pomiaru. Powtórz te pomiary zwiększając stopniowo temperaturę, aż do osiągnięcia maksymalnej temperatury kostki (120°C).

Dla najwyższej temperatury dodatkowo ustaw kostkę stroną czarną w stronę detektora, a następnie pomiędzy detektor i kostkę włóż ekran szklany. Dokonaj pomiaru promieniowania przechodzącego przez szklany ekran.

Na sam koniec wyłącz ogrzewanie sześcianu, zmniejszając jego temperaturę do  $40^{\circ}\text{C}$ .

### III.4. Badanie promieniowania termicznego lampy Stefana-Boltzmana

W tej części eksperymentu wykonasz względne pomiary mocy emitowanej na jednostkę



Rysunek 3. Układ pomiarowy do pomiaru promieniowania termicznego w zależności od odległości i zakresu wysokich temperatur.

powierzchni z gorącego obiektu, a mianowicie lampy Stefana-Boltzmana, w zależności od odległości od źródła promieniowania i jego temperatury. Ustaw układ pomiarowy zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 3. Detektor promieniowania powinien znajdować się na tej samej wysokości co żarnik. Korzystając z kątownika ustaw detektor i lampę tak, aby położenia żarnika i powierzchni detektora pokrywały się z brzegiem ich uchwyty na szynie. W ten sposób pomiar odległości między żarnikiem a detektorem będziesz mógł wykonać za pomocą miarki przyklejonej do szyny. Woltomierz podłącz bezpośrednio do gniazd lampy Stefana-Boltzmana.

PRZY WYŁĄCZONEJ LAMPIE przesunaj czujnik wzdłuż szyny i zapisz odczyty detektora w odstępach co 10 cm.

Ustaw lampę i detektor, tak aby odległość żarnika od powierzchni detektora wynosiła około 5-6 cm i ustaw napięcie zasilające lampy na ok. 1 V. Odczytaj wskazania woltomierza i amperomierza podłączonych do lampy. Wykonaj szybki odczyt na woltomierzu podłączonym do detektora. Pomiedzy odczytami umieść osłonę z pianki izolacyjnej między lampą a czujnikiem (posrebrzaną powierzchnią skierowaną w stronę lampy), dzięki czemu temperatura czujnika pozostaje względnie stała. Zwiększaj stopniowo napięcie zasilające lampę aż do 10 V dokonując kolejnych pomiarów. Dla napięcia zasilającego żarówkę 10 V zwiększaj stopniowo odległość detektora od lampy (zmieniając położenie detektora – NIE ŻARÓWKI). Dla każdej pozycji detektora odczytaj wskazywane na nim napięcie. Powróć z detektorem do położenia początkowego i pomiędzy detektor i żarówkę włóż ekran szklany. Dokonaj pomiaru promieniowania przechodzącego przez szklany ekran.

UWAGA: W trakcie pomiarów żarówka jest bardzo gorąca, dlatego nigdy nie dotykaj jej powierzchni w trakcie pracy.

**Podczas pomiarów nie pozwól, aby napięcie na lampie przekroczyło 13 V.**

#### IV. Analiza wyników pomiarów

W przypadku pomiarów z użyciem kostki Lesliego, głównym zadaniem jakie jest postawione podczas analizy wyników pomiarów jest odpowiedź na pytanie, w jaki sposób promieniowanie termiczne zależy od temperatury ciała i rodzaju powierzchni. Aby to ocenić:

- Uśrednij wartości napięcia zmierzone przy wyłączonym grzaniu kostki, aby określić poziom promieniowania cieplnego w otoczeniu. Odejmij tę średnią wartość od pomiarów przy włączonym grzaniu kostki, aby określić tylko wkład promieniowania kostki ( $U'$ ).
- Na jednym wykresie przedstaw zależność  $U'$  od  $T^4$ , dla różnych rodzajów powierzchni sześcianu (temperatura powinna być w Kelwinach).
- Zaproponuj zależność modelową opisującą Twoje dane.
- Dopasuj zależność modelową dla wszystkich czterech powierzchni, wyznacz parametry dopasowania oraz oceń zasadność zastosowania tego modelu.
- Zakładając, że współczynnik emisji czarnej powierzchni wynosi 0,95, wyznacz współczynniki emisji pozostałych powierzchni.

W przypadku pomiarów z użyciem lampy Stefana-Boltzmana głównym zadaniem jakie jest postawione podczas analizy wyników pomiarów jest odpowiedź na pytanie, w jaki sposób promieniowanie termiczne zależy od temperatury ciała w zakresie  $T \gg T_{ot}$  oraz od odległości od źródła promieniowania. Aby to ocenić:

- Uśrednij wartości napięcia zmierzone przy wyłączonej lampie, aby określić poziom promieniowania cieplnego w otoczeniu. Odejmij tę średnią wartość od pomiarów przy włączonej lampie, aby określić tylko wkład promieniowania lampy ( $U'$ ).
- Dla każdej pary zmierzonego napięcia i natężenia prądu lampy oblicz jej opór  $R = U/I$ .
- Na podstawie wzorów (9) i (10) lub korzystając z Tabeli 1 oblicz temperaturę żarnika, przyjmując, że w temperaturze  $T_{ref} = 300$  K, opór żarnika wynosi  $R_{ref} = 0,277 \Omega$ .
- Przedstaw na wykresie zależność  $\log(U')$  od  $\log(T)$  lub zależność  $U'$  od  $T^4$  (temperatura powinna być w Kelwinach).
- Zaproponuj zależność modelową opisującą Twoje dane.
- Dopasuj zależność modelową, wyznacz parametry dopasowania oraz oceń zasadność zastosowania tego modelu.
- Przedstaw na wykresie zależność  $U'$  od odległości  $r$  żarnika od detektora.
- Zaproponuj zależność modelową opisującą Twoje dane.
- Dopasuj zależność modelową, wyznacz parametry dopasowania oraz oceń zasadność zastosowania tego modelu.

Jakie można wyciągnąć wnioski na temat współczynnika transmisji szkła na podstawie pomiarów transmisji szkła dla kostki Lesliego i żarówki?

Jeśli na którymś z etapów analizy danych prowadzisz dopasowanie zależności modelowej metodą najmniejszych kwadratów, **obowiązkowo** podaj postać dopasowywanej funkcji oraz określ przyjęte niepewności. Podaj uzasadnienie wyboru zmiennej niezależnej, za wyjątkiem sytuacji, w których ona jest z góry narzucona. Przeprowadź walidację modelu uwzględniającą zasadność przyjętych niepewności pomiarowych. Jako wynik dopasowania podaj estymaty dopasowywanych parametrów wraz z ich niepewnościami. W uzasadnionych przypadkach przedyskutuj istotność dopasowywanych parametrów. Do dobrej praktyki należy również w przypadku dopasowania funkcji opisaną więcej niż jednym parametrem podanie kowariancji i współczynników korelacji parametrów a także wykresu reszt z tego dopasowania oraz jego dyskusja.

Pamiętaj też, że najczęściej używana metoda najmniejszych kwadratów wymaga wyników pomiarowych, z których każdy uzyskany jest w niezależnym akcie pomiarowym. **Nie mają takiego charakteru wielkości uzyskane np. w wyniku odejmowania jednej ustalonej wartości od**

wszystkich wyników pomiarów, jeśli wartość odejmowana pochodzi z pomiaru.

## V. Dodatkowe uwagi odnośnie do raportu

Nim przygotujesz raport, zaznajom się z uwagami zawartymi w [wymaganiach dotyczących raportu](#) zamieszczonymi na stronie pracowni. Absolutnie zalecane jest także świadome przyjrzenie się redakcji tekstu, a także tabel, rysunków i wzorów, sposobów ich numerowania, tytułowania i opisywania w dowolnym, ale wydanym przez uznane wydawnictwo, akademickim podręczniku do fizyki, jak również zajrzenie do kilku publikacji w różnych czasopismach naukowych, co może ułatwić podjęcie decyzji co do podziału Twego raportu na części.

W raporcie **obowiązkowo** zamieść wszystkie surowe wyniki pomiarów tak, aby sięgając jedynie do raportu i bez potrzeby odwoływania się do protokołu z doświadczenia można było wykonać pełną i niezależną analizę Twych danych. Pamiętaj, że w niektórych przypadkach uzasadnione jest przeniesienie tych danych do Suplementu. W przypadku bardzo dużej liczby danych pomiarowych (np. zebranych komputerowo) dopuszczalne jest umieszczenie danych nie w formie tabel, ale w formie wykresów. Wówczas oryginalne dane należy dołączyć do raportu w formie cyfrowej (np. w wiadomości email do prowadzącego).

## VI. Literatura uzupełniająca

- D. Halliday, R. Resnick, *Fizyka*, t. I, II, Warszawa 2001. § 49.1 – 49.3;
- A. Zięba, *Analiza danych w naukach ścisłych i technice*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2013.

## Pytania i zadania definiujące wymagania do ćwiczenia

**Problem 1.** Co to jest zdolność emisyjna ciała?

**Problem 2.** Co opisuje prawo Stefana-Boltzmann'a?

**Problem 3.** Jak wraz z odległością zależy moc padającego promieniowania na jednostkową powierzchnię?

**Problem 4.** Wyprowadź wzory na współczynniki  $\alpha$  i  $\beta$  w zależności (8), zakładając, że na detektor pada promieniowanie cieplne z izotropowego źródła o temperaturze  $T$ , współczynniku emisji  $\varepsilon$ , polu powierzchni  $S$ , umieszczonego od detektora w odległości  $r$ . Temperatura otoczenia zarówno detektora jak i źródła wynosi  $T_0$ , a napięcie generowane na detektorze jest równe  $U = \eta(J_{abs} - \sigma T_0^4)$ .

**Problem 5.** Czym jest równowaga termiczna, a czym równowaga termodynamiczna ciała.

**Problem 6.** Człowiek o temperaturze  $36,6^\circ\text{C}$  znajduje się w otoczeniu o temperaturze  $20^\circ\text{C}$ . Oblicz ile energii człowiek traci w ciągu doby na skutek promieniowania zakładając, że jego powierzchnię można przybliżyć powierzchnią prostopadłościanu o wymiarach  $170 \times 40 \times 15 \text{ cm}^3$ .

**Problem 7.** Płaska i cienka płytką, zachowująca się jak ciało doskonale czarne, ustawiona jest prostopadle do kierunku padania promieni słonecznych ponad atmosferą ziemską. Oblicz temperaturę płytki po jej ustaleniu się. Przyjmij, że płytką nie odbiera promieniowania emitowanego przez Ziemię. Ilość energii słonecznej docierającej do Ziemi w jednostce czasu do jednostki powierzchni to tzw. stała słoneczna  $S_s$  która wynosi  $1400 \text{ W/m}^2$ .

Opracowanie: A. Drabińska, lipiec 2021 r.